

MÔ HÌNH HÓA VÀ PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC MÁY LU RUNG XÉT ĐẾN SỰ DỊCH CHUYỂN CỦA LỚP ĐẤT BỔ SUNG TRONG QUÁ TRÌNH ĐẦM

MODELING AND ANALYSIS OF VIBRATORY ROLLER DYNAMICS CONSIDERING THE MOVEMENT OF ADDITIONAL SOIL LAYER DURING COMPACTION

Nguyễn Minh Kha^{1,*},
Lê Văn Dương¹, Trần Đức Thắng¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2025.015>

TÓM TẮT

Trong quá trình đầm thực tế của máy lu rung luôn có một lượng đất bổ sung dịch chuyển lên trong quá trình đầm. Bài báo trình bày mô hình động lực học máy lu rung trong quá trình làm việc có xét đến lượng đất dịch chuyển bổ sung này. Mô hình động lực học có xét đến hệ số độ đàn hồi của hệ thống treo khung xe cơ sở, nền đất đầm và lớp đất dịch chuyển bổ sung. Trên cơ sở mô hình động lực học, phương trình La-grăng loại II được sử dụng để xây dựng hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của cơ hệ. Kết quả bài báo là cơ sở để đánh giá hiệu quả đầm của máy lu rung cũng như đánh giá độ ổn định và rung động trong quá trình làm việc là cơ sở để thiết kế, cải tiến hệ thống treo trên máy lu rung.

Từ khóa: Động lực học, máy lu rung, lớp đất bổ sung.

ABSTRACT

In the actual compaction process of the vibrating roller, there is always an additional amount of soil moving up during the compaction process. This paper presents a dynamic model of the vibrating roller during operation that takes into account this additional amount of soil movement. The dynamic model takes into account the coefficient of elasticity of the suspension system of the base frame, the compacted soil and the additional displacement layer. Based on the dynamic model, the Lagrange equation of the second kind is used to build a system of differential equations describing the motion of the mechanical system. The results of the paper are the basis for evaluating the compaction efficiency of the vibrating roller as well as evaluating the stability and vibration during operation, which is the basis for designing and improving the suspension system on the vibrating roller.

Keywords: Dynamics, vibratory roller, additional soil layer

¹Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email: minhkha97@lqdtu.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/7/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/11/2024

Ngày chấp nhận đăng: 26/01/2025

1. GIỚI THIỆU

Máy lu là một trong nhóm máy thi công chính phục vụ cho công tác làm đường, đây là một trong những loại máy xây dựng quan trọng nhất trong công tác làm nền đường bởi nó quyết định trực tiếp tới chất lượng và tuổi thọ của đường. Nghiên cứu động lực học máy lu là vấn đề phức tạp và có ý nghĩa thực tiễn cao. Đã có nhiều công trình nghiên cứu động lực học máy lu nói chung và máy lu rung nói riêng.

Trong [1, 2], các tác giả đã nghiên cứu động lực học máy lu rung tuy nhiên các mô hình nghiên cứu chưa đầy đủ; công trình nghiên cứu [1] mô hình động lực học xét tương tác của cả trống rung và bánh sau đến nền đất, trong [2] mô hình nghiên cứu xét tương tác giữa trống rung và nền đất tuy nhiên không xét đến dao động khung máy của xe cơ sở cũng như không xét đến lớp đất bổ sung dịch chuyển lên trong quá trình đầm. Trong [3-7], mô hình động lực học đã nghiên cứu đến dao động của phần khung máy xe cơ sở tuy nhiên không xét đến lớp đất bổ sung dịch chuyển trong quá trình đầm. Nghiên cứu [8] tiến hành mô phỏng sự tương tác và dịch chuyển giữa các lớp đất khi thay đổi tần số rung và xem xét nền đất là các phần tử rời rạc. Trong công trình [9] đã nghiên cứu động lực học máy lu rung có xét đến tương tác giữa nền đầm và trống rung nhưng đối tượng đầm là hỗn hợp nhựa đường mà không phải là nền đất và đối tượng nghiên cứu là máy lu đầm tĩnh ba bánh.

Như vậy, hiện nay chưa có công trình nghiên cứu nào xét mô hình động lực học có kể đến sự dịch chuyển của lớp đất bổ sung, do đó các mô hình nghiên cứu trước đó chưa hoàn toàn đầy đủ so với quá trình làm việc thực tế. Trong bài báo này, các tác giả xây dựng mô hình động lực học dựa trên kết cấu của máy lu rung KOMATSU JV100WA-2, cơ hệ bao gồm khung máy xe cơ sở, trống rung, nền đất đầm và lớp đất bổ sung dịch chuyển. Mô hình động lực học có xét đến hệ số độ đàn hồi của hệ thống treo khung xe cơ sở, nền đất và lớp đất dịch chuyển bổ sung. Trên cơ sở mô hình khảo sát, các tác giả đưa ra kết quả biên độ chuyển vị, vận tốc chuyển vị, gia tốc chuyển vị của các khâu.

2. MÔ HÌNH MÁY LU RUNG XÉT ĐẾN LƯỢNG ĐẤT BỔ SUNG TRONG QUÁ TRÌNH ĐẦM

Các giả thiết khi xây dựng mô hình:

Mô hình được xây dựng dựa trên việc quy đổi các tác động qua lại của khung máy xe cơ sở, trống rung, nền đất và lớp đất bổ sung thành các khối lượng, các lò xo và bộ giảm chấn được liên kết với nhau. Các giả thiết để xây dựng mô hình để đơn giản trong quá trình tính toán, đồng thời dựa trên kết cấu thật của máy lu rung Komatsu JV100WA-2 (hình 1).



Hình 1. Máy lu rung KOMATSU JV100WA-2

Các giả thiết khi xây dựng mô hình động lực học:

- Xem xét các chuyển động của máy trong quá trình làm việc theo phương thẳng đứng, bỏ qua dao động theo phương ngang.

- Khối lượng nền đất chịu tác dụng trực tiếp của trống rung, ký hiệu m_n .

- Độ cứng của khung máy gắn với trống rung được quy đổi về một lò xo có hệ số đàn hồi, ký hiệu k_{cs} .

- Các gối cao su giảm chấn liên kết giữa trống rung và khung máy xe cơ sở được quy đổi về một giảm chấn có hệ số cản nhớt, ký hiệu c_{cs} .

- Nền đất đầm mô tả biến dạng dẻo - biến dạng đàn hồi thông qua độ nén chặt của nền đất và được quy đổi thành hệ thống 3 lò xo bao gồm hai lò xo k_{pl} và một lò xo k_{pl} - độ biến dạng dẻo của nền đất và k_{el} - độ biến dạng đàn hồi của nền đất.

- Độ cứng và giảm chấn của khối lượng đất bổ sung được quy đổi thành một lò xo đàn hồi và một giảm chấn, ký hiệu lần lượt là k_{bs} và c_{bs} .

- Lực gây rung F_r được đặt ở tâm m_{tr} .

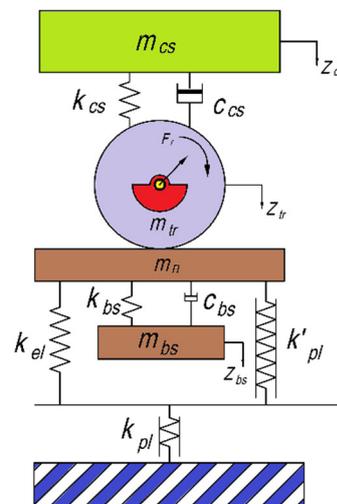
- Căn cứ vào sự gia tăng biến dạng dẻo (độ nén chặt) của đất khi chịu tác dụng của trống rung, gây ra lực làm dịch chuyển đất để chuyển hóa năng lượng. Dùng mô hình lò xo thay thế lực tác dụng có thể biểu diễn được sự dịch chuyển của đất theo các biến dạng dẻo và đàn hồi.

Các thông số trên mô hình:

Z_{cs} : dịch chuyển của khung máy xe cơ sở, m; Z_{tr} : dịch chuyển của trống rung và nền đất, m; Z_{bs} : dịch chuyển của lớp đất bổ sung, m; m_{cs} : khối lượng khung máy của xe cơ sở đặt trên tang trống, kg; m_{tr} : khối lượng của trống rung (kg) được gây rung bởi lực rung F_r ; m_n : khối lượng nền đất đầm, kg; m_{bs} : khối lượng lớp đất bổ sung để kiểm soát chuyển động của nền đất trong quá trình nảy lên của trống rung, kg; k_{cs} : hệ số độ cứng của lò xo liên kết khung máy xe cơ sở và trống rung, N/m; c_{cs} : hệ số cản nhớt của giảm chấn liên kết khung máy và trống rung, Ns/m; k_{el} : hệ số biến dạng đàn hồi của nền đất, N/m; k_{pl} , k_{pl} : hệ số biến dạng dẻo của nền đất, N/m; k_{bs} : hệ số độ cứng của lò xo của lớp đất bổ sung, N/m; c_{bs} : hệ số cản nhớt cho lớp đất bổ sung, Ns/m.

Tọa độ suy rộng: $q = [q_i]^T = [Z_{cs} \ Z_{tr} \ Z_{bs}]^T$

Mô hình động lực học máy lu rung được thể hiện như trên hình 2.



Hình 2. Mô hình động lực học máy lu rung có xét đến lớp đất bổ sung trong quá trình đầm

Đặc tính động lực học của máy lu rung được thể hiện trên hệ bốn phương trình vi phân được thiết lập dựa trên phương pháp Lagrange loại II với phương trình có dạng:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} = Q_i \quad (i=1 \div 3) \quad (1)$$

Động năng của cơ hệ:

Bao gồm động năng của khung máy xe cơ sở (T_{cs}), động năng của trống rung và nền đất đầm (T_{tr+n}) và động năng lớp đất bổ sung dịch chuyển (T_{bs}).

$$T = T_{cs} + T_{tr+n} + T_{bs} \quad (2)$$

- Động năng khung máy xe cơ sở được xác định theo công thức:

$$T_{cs} = \frac{1}{2} m_{cs} \dot{z}_{cs}^2 \quad (3)$$

- Động năng trống rung và nền đất đầm được xác định theo công thức:

$$T_{tr+n} = \frac{1}{2} (m_{tr} + m_n) \dot{z}_{tr}^2 \quad (4)$$

- Động năng lớp đất dịch chuyển được xác định theo công thức:

$$T_{bs} = \frac{1}{2} m_{bs} \dot{z}_{bs}^2 \quad (5)$$

- Động năng cơ hệ được xác định theo công thức:

$$T = \frac{1}{2} m_{cs} \dot{z}_{cs}^2 + \frac{1}{2} (m_{tr} + m_n) \dot{z}_{tr}^2 + \frac{1}{2} m_{bs} \dot{z}_{bs}^2 \quad (6)$$

Thế năng của cơ hệ:

Bao gồm thế năng trọng trường và thế năng đàn hồi của xe cơ sở, trống rung và nền đất; lượng đất nảy lên.

$$\Pi = \Pi_{cs} + \Pi_{tr+n} + \Pi_{bs} \quad (7)$$

- Thế năng của xe cơ sở được xác định theo công thức:

$$\Pi_{cs} = \frac{1}{2} k_{cs} (z_{cs} - z_{bs})^2 - m_{cs} g z_{cs} \quad (8)$$

- Thế năng của trống rung và nền đất được xác định theo công thức:

$$\begin{aligned} \Pi_{tr+n} = & \frac{1}{2} k_{td} z_{tr}^2 + \frac{1}{2} k_{cs} (z_{tr} - z_{cs})^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{bs} (z_{tr} - z_{bs})^2 - (m_{tr} + m_n) g z_{tr} \end{aligned} \quad (9)$$

Với k_{td} được xác định theo công thức:

$$\frac{1}{k_{td}} = \frac{1}{k_{pl} + k_{el}} + \frac{1}{k'_{pl}} \Rightarrow k_{td} = \frac{(k_{pl} + k_{el}) k'_{pl}}{k_{pl} + k_{el} + k'_{pl}} \quad (10)$$

- Thế năng của lượng đất bổ sung dịch chuyển lên được xác định theo công thức:

$$\Pi_{bs} = \frac{1}{2} k_{bs} (z_{bs} - z_{tr})^2 - m_{bs} g z_{bs} \quad (11)$$

- Thế năng cơ hệ được xác định theo công thức:

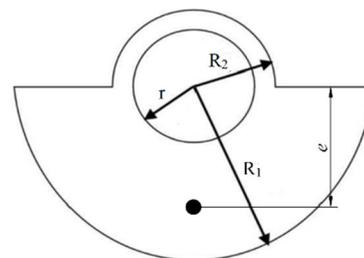
$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} k_{cs} (z_{cs} - z_{bs})^2 + \frac{1}{2} k_{td} z_{tr}^2 + \frac{1}{2} k_{cs} (z_{tr} - z_{cs})^2 \\ & + \frac{1}{2} k_{bs} (z_{tr} - z_{bs})^2 + \frac{1}{2} k_{bs} (z_{bs} - z_{tr})^2 \\ & - [m_{bs} z_{bs} + (m_{tr} + m_n) z_{tr} + m_{cs} z_{cs}] g \end{aligned} \quad (12)$$

Hàm hao tán của cơ hệ được xác định theo công thức:

$$\Phi = \frac{1}{2} c_{cs} (z_{cs} - z_{tr})^2 + \frac{1}{2} c_{bs} (z_{tr} - z_{bs})^2 \quad (13)$$

Xác định lực suy rộng: $Q = [Q_1 \ Q_2 \ Q_3]^T = [0 \ F_r \ 0]^T$

Xác định lực gây rung F_r . Cấu tạo khối lệch tâm được thể hiện trên hình 3.



Hình 3. Cấu tạo khối lệch tâm

Theo [8], lực rung được xác định theo công thức:

$$F_r = m_{lt} e \omega \sin(\omega t) \quad (14)$$

Với:

+ $\omega = 2\pi f$ với f là tần số rung:

$$f = \frac{\pi n}{60} \quad (15)$$

Trong đó: n là tốc độ vòng quay của trống rung (vòng/phút);

+ m_{lt} là khối lượng của khối lệch tâm;

+ e là bán kính lệch tâm của khối lệch tâm và được xác định theo công thức:

$$e = \frac{4(R_1^3 - R_2^3)}{3\pi(R_1^2 + R_2^2 - 2r^2)} \quad (16)$$

Thế các biểu thức động năng, thế năng, hàm hao tán và lực suy rộng vào phương trình (1), hệ phương trình vi phân mô tả động lực học quá trình làm việc của máy lu rung như sau:

$$m_{cs}\ddot{z}_{cs} + c_{cs}\dot{z}_{cs} - c_{cs}\dot{z}_{tr} + k_{cs}z_{cs} - k_{cs}z_{tr} - m_{cs}g = 0 \quad (17)$$

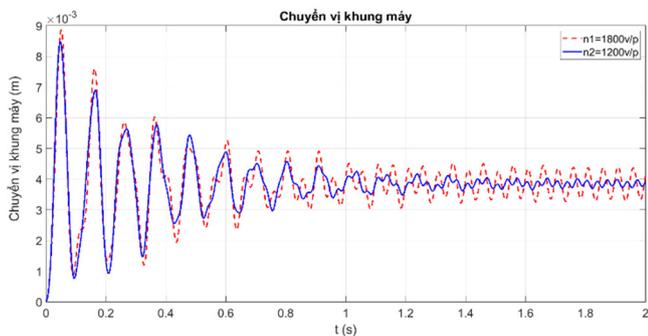
$$(m_{tr} + m_n)\ddot{z}_{tr} - c_{cs}\dot{z}_{cs} + (c_{cs} + c_{bs})\dot{z}_{tr} - c_{bs}\dot{z}_{bs} - k_{cs}z_{cs} + (k_{td} + k_{bs} + k_{cs})z_{tr} - k_{bs}z_{bs} - (m_{tr} + m_n)g - F_r = 0 \quad (18)$$

$$m_{bs}\ddot{z}_{bs} - c_{bs}\dot{z}_{tr} + c_{bs}\dot{z}_{bs} - k_{bs}z_{tr} - k_{bs}z_{bs} - m_{bs}g = 0 \quad (19)$$

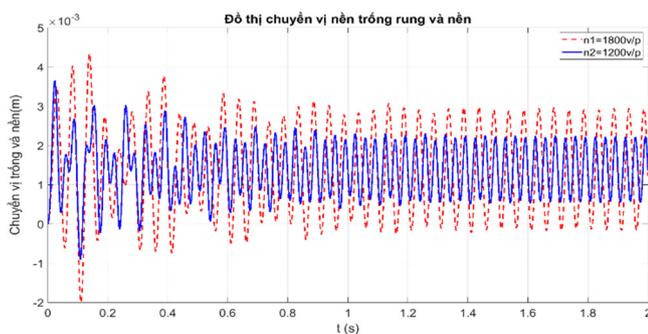
3. KẾT QUẢ

Bộ thông số đầu vào [10]: $m_{cs} = 1376(\text{kg})$; $m_{tr} = 4750(\text{kg})$; $m_n = 700(\text{kg})$; $m_{bs} = 70(\text{kg})$; $k_{cs} = 5,4 \cdot 10^6 (\text{N/m})$; $k_{bs} = 1,46 \cdot 10^6 (\text{N/m})$; $c_{cs} = 10480 (\text{Ns/m})$; $c_{bs} = 3440 (\text{Ns/m})$; $k_{pl} = 49,3 \cdot 10^6 (\text{N/m})$; $k'_{pl} = 75,8 \cdot 10^6 (\text{N/m})$; $k_{el} = 87 \cdot 10^6 (\text{N/m})$; $R_1 = 0,111(\text{m})$; $R_2 = 0,075(\text{m})$; $r = 0,003(\text{m})$. Trong phạm vi bài báo này tác giả khảo sát các thông số động lực học trong hai tần số rung là $n_1 = 1800$ vòng/phút; $n_2 = 1200$ vòng/phút. Giải hệ phương trình vi phân bằng phần mềm Matlab ta thu được kết quả trên hình (4) - (6) như sau:

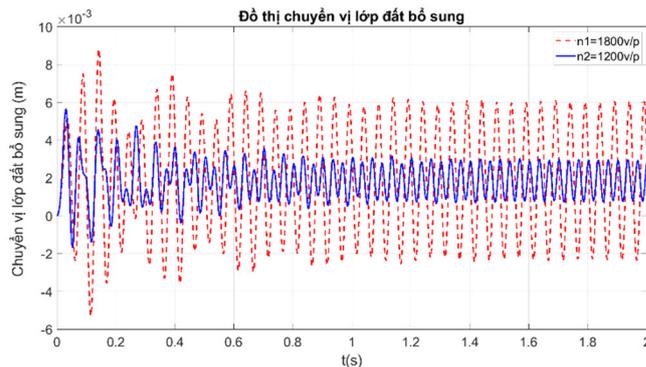
Đồ thị dịch chuyển các khâu: Ban đầu khi cơ hệ chuyển từ trạng thái tĩnh sang trạng thái động chuyển vị các khâu chưa theo một quy luật nhất định; sau đó dưới tác dụng giảm chấn của hệ thống treo và nền đất các độ dịch chuyển các khâu ổn định dần sau khoảng 1(s). Sau 1(s) tại $n_1 = 1800$ vòng/phút chuyển vị của khung máy xe cơ sở, trống rung và nền đất, lớp đất bổ sung lần lượt là 4,5 (mm); 3 (mm); 6 (mm); tại $n_2 = 1200$ vòng/phút chuyển vị của khung máy xe cơ sở, trống rung và nền đất, lớp đất bổ sung lần lượt là 4 (mm); 2,5 (mm); 3 (mm). Như vậy, nếu tần số rung càng cao thì hiệu quả đầm càng lớn.



a)



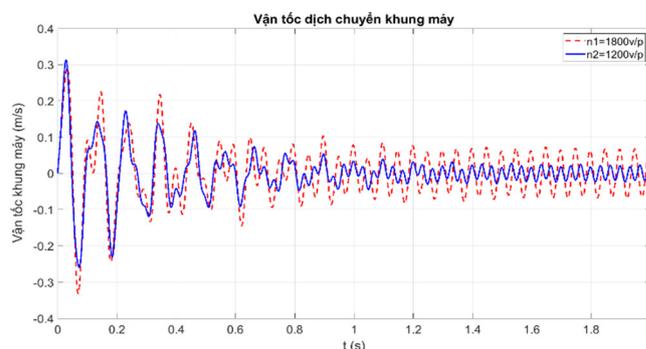
b)



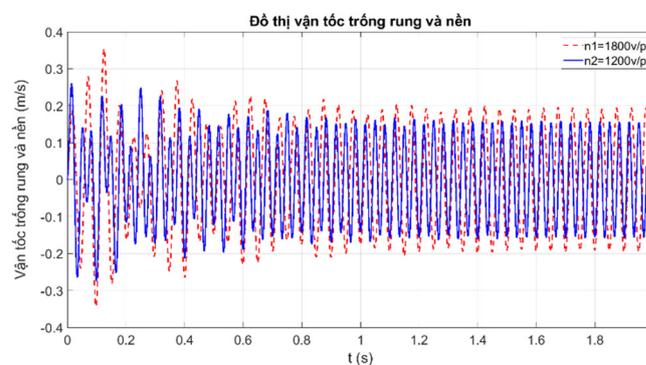
c)

Hình 4. Chuyển vị khung máy cơ sở (a), trống và nền (b) và lớp đất bổ sung (c)

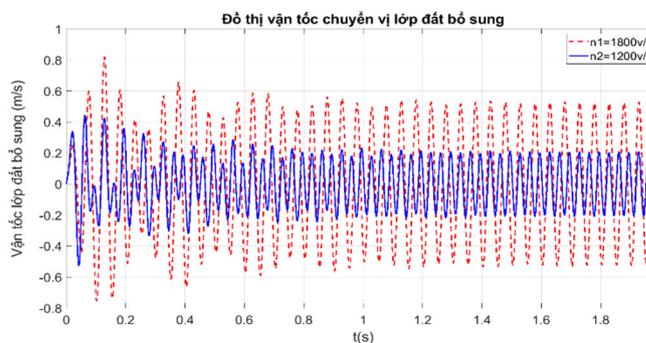
Đồ thị vận tốc các khâu:



a)



b)



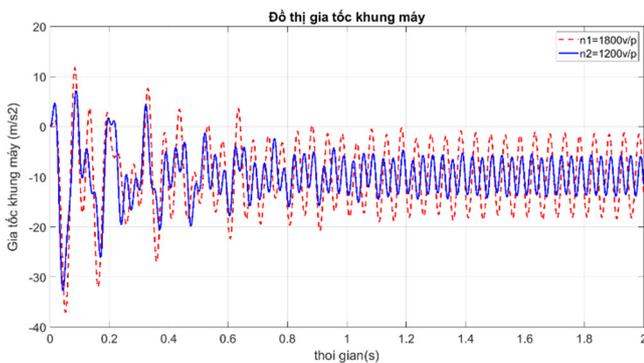
c)

Hình 5. Vận tốc chuyển vị khung máy cơ sở (a), trống và nền (b) và lớp đất bổ sung (c)

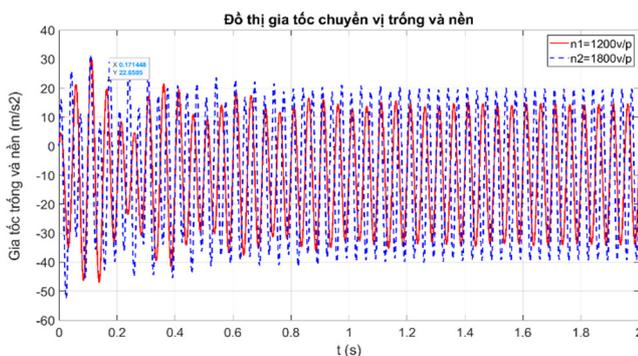
Qua kết quả khảo sát ta thấy: Ban đầu khi cơ hệ chuyển từ trạng thái tĩnh sang trạng thái động vận tốc các khâu chưa theo một quy luật nhất định; sau đó dưới tác dụng giảm chấn của hệ thống treo và nền đất cơ hệ ổn định dần sau khoảng 1(s). Sau 1(s) tại $n_1 = 1800$ vòng/phút vận tốc dịch chuyển của khung máy xe cơ sở, trống rung và nền đất, lớp đất bổ sung lần lượt là 0,1 (m/s); 0,2 (m/s); 0,6 (m/s); tại $n_2 = 1200$ vòng/phút chuyển vị của khung máy xe cơ sở, trống rung và nền đất, lớp đất bổ sung lần lượt là 0,05 (m/s); 0,15 (m/s); 0,3 (m/s). Như vậy, nếu tần số rung càng cao thì vận tốc dịch chuyển các khâu càng lớn.

Đồ thị gia tốc các khâu:

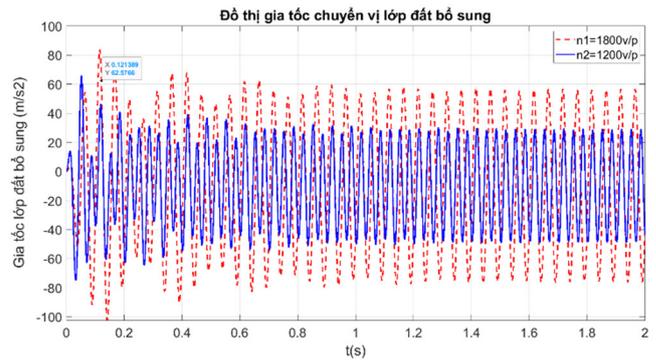
Qua kết quả khảo sát ta thấy: Ban đầu khi cơ hệ chuyển từ trạng thái tĩnh sang trạng thái động gia tốc các khâu chưa theo một quy luật nhất định; sau đó dưới tác dụng giảm chấn của hệ thống treo và nền đất cơ hệ ổn định dần sau khoảng 1(s). Sau 1(s) tại $n_1 = 1800$ vòng/phút gia tốc dịch chuyển của khung máy xe cơ sở, trống rung và nền đất, lớp đất bổ sung lần lượt là 10 (m/s²); 20 (m/s²); 60 (m/s²); tại $n_2 = 1200$ vòng/phút chuyển vị của khung máy xe cơ sở, trống rung và nền đất, lớp đất bổ sung lần lượt là 5 (m/s²); 15 (m/s²); 30 (m/s²). Như vậy, nếu tần số rung càng cao thì gia tốc các khâu càng lớn. Ngoài ra, gia tốc của lớp đất bổ sung lớn hơn so với các khâu khác, điều này là do khối lượng lớp đất bổ sung nhỏ và chịu tác động của lực đầm rung lớn trong thời gian rất ngắn.



a)



b)



c)

Hình 6. Gia tốc chuyển vị khung máy cơ sở (a), trống và nền (b) và lớp đất bổ sung (c)

Như vậy, các kết quả thu được trên các hình (4)-(6) là hoàn toàn phù hợp với quá trình làm việc thực tế.

4. KẾT LUẬN

Như vậy, trong bài báo này tác giả đã xây dựng được mô hình động lực học máy lu rung có xét đến sự dịch chuyển của lớp đất bổ sung trong quá trình đầm. Trên cơ sở mô hình động lực học đã xây dựng, đã tiến hành khảo sát độ chuyển vị, vận tốc dịch chuyển và gia tốc dịch chuyển của cả khâu (khung xe cơ sở, trống rung và nền, lớp đất bổ sung). Bài báo đã tiến hành khảo sát với mô hình hoàn chỉnh hơn so với các công trình trước đó. Kết quả của bài báo là cơ sở để đánh giá độ ổn định, rung động của máy trong quá trình làm việc khi xét đến lượng đất bổ sung dịch chuyển lên. Đây là cơ sở để cải tiến, thiết kế hệ thống treo giúp giảm thiểu rung động tác dụng lên người vận hành trong quá trình làm việc.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Đỗ Đăng Khoa, Nguyễn Thanh Dũng, Phan Đăng Phong, Đỗ Sanh, "Khảo sát động lực học ngược của lu đầm rung," *Hội nghị Khoa học toàn quốc lần thứ hai về Động lực học và Điều khiển*, Đại học Bách khoa Hà Nội, t95-100, 2022.

[2]. Trần Hữu Lý, *Nghiên cứu xác định chế độ làm việc hợp lý của máy lu rung thi công đất nền đường tuần tra biên giới*. Luận án Tiến sĩ, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội, 2012.

[3]. A. Pogany, S. Zdrenghia, "Un procedeu de verificare a compactării terasamentelor prin folosirea cilindrului compactor vibrator", in *XVI-a International Conference, "Profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești"*, Sebes, 593-600, 2016.

[4]. Dragoș Căpățînă, Marilena Cristina Nițu, Mihaiela Iliescu, "Modeling the vibratory roller compaction process of road soils," *Archives of civil engineering*, LXIX, 431-444, 2023. doi: 10.24425/ace.2023.147668

[5]. S. Li, C. Hu, "Study on Dynamic Model of Vibratory Roller - Soil System", in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 113, art. no. 012187, 2018. doi: 10.1088/1755-1315/113/1/012187.

[6]. Li Z., C. Xu, "Adaptive fuzzy logic control of dynamic balance and motion for wheeled inverted pendulums," *Fuzzy Sets and Systems*, 160(12), 1787-1803, 2009.

[7]. Hu Peng, Chen Jiazhen, Zhang Lejin, Wang Kun, Wang Shuping, Chi Liyang, "Discrete element simulation of vibration compaction of slag subgrade," *Scientific Reports*, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55276-2>

[8]. V. B. Permyakov, V. V. Dubkov, V. S. Serebrennikov, "Analytical description of the process of compacting an asphalt concrete mixture with a vibrating roller," *OMSK Scientific Bulletin*, 1 (64), 67-71, 2008.

[9]. P A Korchagin, I A Teterina, E A Korchagina, "Road roller operator's vibroprotection system improvement," *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. doi:10.1088/1742-6596/1791/1/012012

[10]. Shop manual KOMATSU JV100-2

AUTHORS INFORMATION

Nguyễn Minh Kha, Lê Văn Dương, Trần Đức Thắng

Institute of Mechanical and Dynamics, Le Quy Don Technical University,
Vietnam